

AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO NA FORMULAÇÃO DE CONCRETOS PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS

Viviane Reis Silva¹ (IC), Carlos Augusto de Souza Oliveira (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Concreto. Pavimento Rígido. Rejeito de Minério de Ferro. Sustentabilidade.

Introdução

O setor da mineração é fundamental para o desenvolvimento tecnológico e econômico da sociedade, pois a partir de seu beneficiamento é possível produzir insumos essenciais para diversos segmentos industriais. No entanto, a atividade gera um volume elevado de rejeito, que normalmente são armazenados em diques ou barragens, o que tem gerado uma série de problemas ambientais. Em vista disso, uma das preocupações ambientais concernentes às atividades extrativas, envolve a necessidade de buscar soluções mais sustentáveis que permitam a redução da geração desses materiais, através do aumento da eficiência das rotas de beneficiamento mineral, bem como sua inserção em outras cadeias produtivas, fomentando assim a economia circular.

Nesse contexto, muitos pesquisadores têm estudado formas de utilizar o rejeito de minério de ferro (RMF), como material alternativo nos diversos ramos da cadeia produtiva da construção civil. Dentre os materiais presentes na construção civil, o concreto é o mais consumido (GAGG, 2014). Sendo que a área de pavimentos urbanos e rodovias de concreto, juntas ocupam a 3ª posição do ranking de obras que mais consomem concreto no mundo (SANTOS, 2021).

Em materiais cimentícios, a principal forma de utilização de RMF é por substituição ao agregado natural. Isso se justifica devido o material ser relativamente inerte e possuir granulometrias próximas da areia (CARRASCO et al., 2016; PROTASIO et al., 2021).

O pavimento rígido (PVR) é aquele em que a camada de rolamento é constituída por concreto, o qual pode ser feito por pré-moldagem ou produção in loco (BALBO, 2009). Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT (2005), o concreto destinado a esse tipo de construção deve atender uma resistência à tração na flexão na ordem de 4,5 MPa ou, quando estruturalmente armado, uma resistência característica à compressão axial em torno de 30 MPa.

Panditharadhya et.al. (2017) avaliaram as propriedades mecânicas do concreto destinado a construção de PVR com a incorporação de RMF como substituto parcial do agregado miúdo. Os autores ponderam que os melhores

resultados referentes a resistência à compressão e à flexão, ocorrem quando a mistura contempla no máximo o teor de 40% de rejeitos. Os valores obtidos em concretos com 28 dias de idade foram respectivamente: resistência à compressão igual a 50,27 MPa e resistência à flexão igual a 3,50 MPa. Essa como outras literaturas, referentes aos conceitos, parâmetros e metodologias empregadas para a aplicação do RMF na produção de concretos, proporcionou direcionamento para as escolhas dos procedimentos a serem adotados neste experimento. O objetivo desta pesquisa consiste em avaliar a viabilidade técnica de formulação de concretos de cimento Portland para PVR, utilizando RMF fornecido pela mineradora Vale S.A, em substituição parcial, à areia natural. A relevância desse estudo se encontra no fato da necessidade de buscar soluções sustentáveis e economicamente viáveis e avaliar a aplicabilidade do RMF de forma a reduzir a extração de matérias-primas naturais e conseqüentemente dispor de proveitos financeiros, uma vez que proporciona um fim econômico para um material dantes descartado.

Metodologia

A caracterização dos agregados miúdos e graúdos consistiu em procedimentos específicos estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Para tal, realizou ensaios para determinar: composição granulométrica, módulo de finura, massa específica, massa unitária, absorção de água. Além disso, o RMF foi caracterizado quanto sua morfologia (forma e tamanho), através da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Na caracterização do aglomerante, foi usado o Cimento Portland de alto forno com resistência mínima à compressão de 32 MPa e resistente a sulfatos (CP III-32 RS). A avaliação de sua resistência foi realizada conforme as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 2019). O ensaio foi realizado em uma argamassa de cimento Portland e areia nas proporções, em massa, 1 :3, e relação água/cimento de 0,48, com adensamento manual.

Partindo dos critérios estabelecidos pela norma DNIT-054/2004-PRO, realizou a dosagem do concreto através

da metodologia ABCP/ACI (Associação Brasileira de Cimento Portland), adotando como parâmetros de referências em todas as formulações de concreto a relação de água/cimento (0,44), resistência de dosagem à compressão do concreto aos 28 dias de idade de 50 MPa, trabalhabilidade de 70 mm ± 10 mm, 0,2 % de aditivo e teor de argamassa de 49%.

A partir do traço de referência (C0%) foram feitas as misturas em proporções com teores de 20% e 40% de RMF e foram submetidos a períodos de cura de 28 dias.

Os concretos foram avaliados em seu estado fresco quanto a trabalhabilidade (Slump Test). Realizou-se essa análise com o objetivo de avaliar a influência do RMF na trabalhabilidade e na textura do concreto. Já no estado endurecido foram avaliados quanto a resistência à compressão simples, a resistência à tração na flexão, a densidade aparente, a porosidade aparente, a absorção de água e ao desgaste por abrasão. Realizou-se essa análise com o objetivo de avaliar a influência do RMF nas propriedades mecânicas e na durabilidade do concreto.

Para o ensaio de compressão, foram moldados 4 corpos-de-prova (CPs) cilíndrico, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, para cada traço e tipo de concreto analisado. Foram rompidos em 7 dias e 28 dias de idade. Já para o ensaio de tração na flexão, para cada traço e tipo de concreto analisado, foram moldados 3 CPs prismáticos com 50 cm de comprimento, 15 cm de largura e 15 cm de altura, rompidos aos 28 dias de idade.

Foram extraídos das metades dos CPs utilizados no ensaio de tração na flexão, novos corpos de provas. Sendo 10 CPs para cada mistura (cubos com lados de 6 cm) usados para determinar a densidade aparente, a porosidade aparente e a absorção de água. E 12 CPs, para determinar o desgaste por abrasão, sendo que para cada traço foi avaliado um conjunto de 4 CPs com comprimento e largura de 7 cm e altura no intervalo 2,5 cm -3,0 cm.

Com o objetivo de avaliar a microestrutura dos concretos produzidos, foi realizado o ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV, modo elétron secundário). Utilizando amostras retiradas de fragmentos extraídos dos CPs submetidos ao ensaio de resistência à compressão aos 28 dias de idade. E com essas amostras foi avaliado a zona de transição e as diferenças na estrutura, tal como, porosidade.

Resultados e discussão

A Figura 1 apresenta os resultados da caracterização dos agregados miúdos.

Figura 1 – Caracterização dos agregados miúdos

	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)	Absorção de água (%)	D _{máx} (mm)	Modulo de Finura
Areia	2,58	1,27	1,1	2,36	2,74
Rejeito	2,62	1,49	0,2	0,60	0,45

O RMF apresentou ter uma grande proporção de fino, apresentando cerca de 39% da massa total retida na peneira 0,075 mm e 28% da massa total inferior a 0,075 mm. Essa característica granulométrica foi um sinalizador do uso de aditivos plastificante na formulação dos concretos para PVR, tendo que para esse tipo de aplicação é recomendado um concreto que apresente uma consistência plástica. A análise das imagens do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), quanto ao aspecto morfológico, evidenciou a presença de partículas maiores, subarredondadas a angulosas. Em relação a dimensão, os grãos do RMF variaram no intervalo de 17,39µm - 715,11µm.

Os resultados para os agregados graúdos (Figura 2) mostraram que o agregado graúdo brita I apresentou graduação 1, e o agregado graúdo brita II aproximou da graduação 0.

Figura 2 – Caracterização dos agregados graúdos

	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)	Absorção de água (%)	D _{máx} (mm)	Modulo de Finura	Resistência à abrasão (%)
Brita I	2,60	1,42	0,5	25,00	6,98	40
Brita II	2,53	1,33	0,6	12,50	5,75	48

O ensaio de caracterização do Cimento Portland evidenciou que o aglomerante utilizado atende as exigências mecânicas estabelecidas pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Todos os valores obtidos superaram os valores mínimos estabelecidos pela norma, sendo que aos 28 dias de idade, o cimento apresentou uma resistência mínima à compressão de 36,2 Mpa.

A Figura 3 apresenta o consumo de materiais para produzir aproximadamente 0,041 m³ de concreto de cada mistura. A partir do traço de referência (C0%), foram desenvolvidos os traços com incorporação do RMF, por meio de substituição do agregado miúdo no traço de referência.

Figura 3 – Consumo de materiais

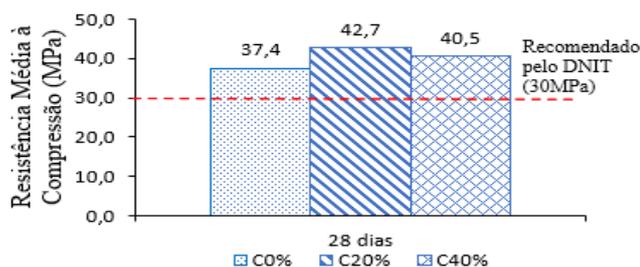
	Cimento	Consumo de materiais (kg)					Aditivo (%)
		Areia	RMF	Brita 0	Brita 1	Água	
C0%	22	34,88	-	10,89	25,42	9,57	0,2
C20%	22	27,91	6,98	10,89	25,42	9,57	0,2
C40%	22	20,93	13,95	10,89	25,42	9,57	0,2

A avaliação da trabalhabilidade das misturas C0%, C20% e C40% mostrou que não houve um padrão de comportamento com o aumento do percentual de RMF em relação ao *Slump*. O abatimento de cone das misturas C0%, C20% e C40% foram de 80 mm, 100 mm e 75 mm respectivamente. O abatimento das misturas C0% e C40% se encontram na faixa de 60 mm a 80 mm, atendendo as premissas estabelecidas no Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005). Visualmente os concretos ficaram mais coesos à medida que se elevou o

teor de RMF, corroborando com a literatura, que relata que a adição de RMF promove a redução da trabalhabilidade e o aumento da coesão (CARRASCO et al., 2017; SHETTIMA et al., 2016).

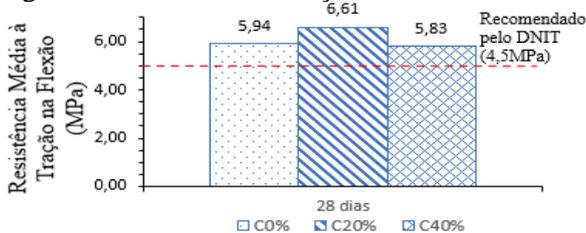
A avaliação dos concretos no estado endurecido, demonstrou que os valores de resistência à compressão axial dos CPs rompidos aos 28 dias (Figura 4), para as mistururas com substituição de 20% e 40% de RMF foram, respectivamente, 15,8% e 8,3% maior que a resistência do concreto de referência.

Figura 4 – Resistência à compressão axial



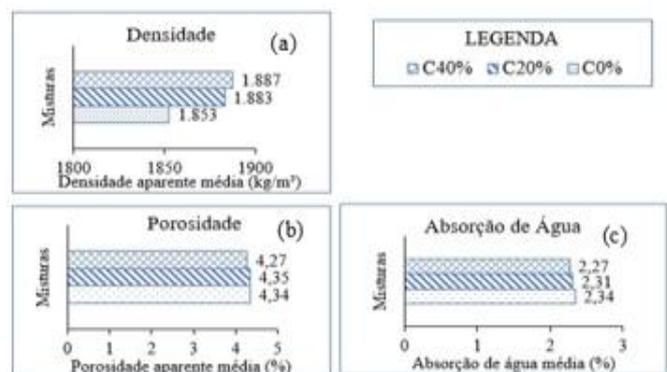
E quanto a tração na flexão (Figura 5), a mistura de concreto formulada com teor de 20% de RMF apresentou a maior resistência à tração na flexão, sendo 11,3% maior que a resistência do concreto de referência. O resultado com a mistura C40% foi próximo daqueles obtidos na mistura C0%, ressaltando-se o fato de todos estarem acima do mínimo exigido (4,5 MPa).

Figura 5 – Resistência à tração na flexão



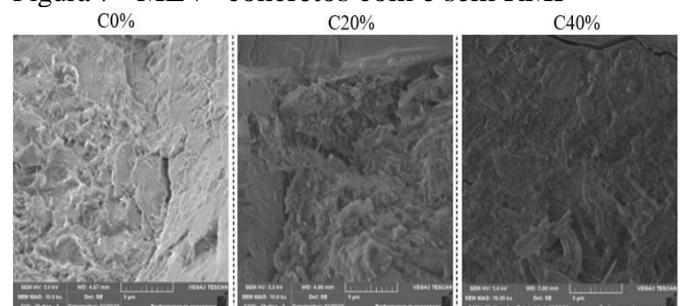
Os resultados referentes a densidade, Figura 6 (a), revelaram que a medida em que o teor de RMF é aumentado a densidade aparente do concreto aumenta. Isso pode ser justificado devido a massa específica e a massa unitária do RMF ser maior que as massas apresentadas pelo agregado miúdo natural. Além disso, os resultados da absorção de água, Figura 6 (c) também justificam o aumento da densidade do concreto com a elevação do teor de RMF. Acredita-se que as características físicas do rejeito podem estar promovendo um refinamento da microestrutura do concreto, por meio da redução da porosidade, Figura 6 (b). Isso é um sinalizador do benefício do RMF para o aumento da durabilidade do concreto. Segundo Shettima et al. (2016) a diminuição correspondente as capacidades de absorção são em razão do rejeito de minério influenciar no refinamento de poros e grãos do concreto.

Figura 6 – Propriedades do concreto



Em relação ao desgaste por abrasão, as misturas tiveram em média as seguintes perdas de massa após 500 voltas: 8,61% (C0%), 10,60% (C20%) e 10,85 % (C40%). Nota-se que a perda de massa aumentou à medida que se elevou o teor de RMF no concreto. No entanto, durante o percurso de 1 Km, os concretos C0% e C40%, tiveram uma perda de espessura bem próxima, sendo de 22,17 mm e 23,73 mm, respectivamente. O desgaste está intrinsecamente associado à falha de seus componentes (BADGER, 2009). Por essa perspectiva, e com os resultados da pesquisa, pressupõem que a adição de RMF promoveu a elevação da dureza da matriz cimentícia e a exposição dos grãos da brita ao processo de friabilidade. Já as imagens da microestrutura geradas por elétrons secundários (Figura 7), revelaram concretos com uma microestrutura densa, sendo que a incorporação de RMF contribuiu para essa característica, fato esse que pode ser justificado pelos resultados da densidade aparente. Considerando que o fator a/c foi igual para todos os concretos e corroborado por Shettima et al. (2016) o RMF proporcionou a redução da porosidade. Dessa forma, o RMF mostra ser um material que pode contribuir no efeito de refinamento dos poros do concreto.

Figura 7 - MEV- concretos com e sem RMF



Em razão, de não ter poros grandes visíveis na zona de transição e o elo entre o agregado graúdo e a pasta parecer menos espessa, indica que a microestrutura dos concretos produzidos se assemelha às de concretos com boa densidade.

Conclusões

Os resultados mostram a potencialidade de incorporação de RMF em concretos, sem alterar significativamente as

propriedades do concreto, e em alguns casos sinalizam uma manutenção do comportamento mecânico ou até mesmo um possível aumento, como os apresentados neste trabalho. Com relação às propriedades do concreto fresco, o estudo aponta que o uso do RMF em proporções superiores a 40% em substituição à areia, tendem a diminuir a trabalhabilidade. Já no estado endurecido, os resultados mostram que as misturas incorporadas com RMF proporcionaram um aumento da resistência à compressão em todas as idades estudadas. Entretanto, ressaltamos que a mistura C20% apresentou os melhores resultados mecânicos.

A análise das imagens do MEV revelou para os concretos uma microestrutura densa, principalmente no C40%, fato esse, comprovado por meio do ensaio de densidade aparente. Os resultados, no que diz respeito a resistência à abrasão, mostraram que, à medida que se elevou o teor de RMF, o desgaste por abrasão aumentou. Esse comportamento pode ser em razão do RMF promover aumento da dureza da matriz cimentícia e a exposição dos grãos da brita ao processo de friabilidade. Além disso, os resultados sinalizaram que o RMF ocasionou o refinamento dos poros do concreto, a redução da sua porosidade e absorção de água, benefícios técnicos importantes para a durabilidade.

Os níveis de desempenho mecânicos alcançados possibilitam alterações nas dosagens de cimento Portland, de água ou de aditivo, desde que atendam os requisitos mínimos especificados pelo DNIT, com a finalidade de produzir um composto mais econômico e sustentável.

Portanto, os resultados obtidos nessa pesquisa sinalizam que seja viável o uso do rejeito de minério de ferro em substituição parcial do agregado miúdo natural, para o preparo de concretos, em especial, concretos para pavimento rígido.

Agradecimento

Ao CNPq pelo auxílio financeiro, na forma de uma bolsa de iniciação científica, ao MATCIME - Grupo de pesquisa de Materiais para Indústria da Construção Civil e Mecânica pelas contribuições científicas e à mineradora VALE S.A.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland-Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland-Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BADGER, J. Factors affecting wheel collapse in grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 58, p. 307-310, 2009.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficinas de Textos, 2009.

CARRASCO, E. V. M., MAGALHÃES, M. D. C., SANTOS, W. J. D., ALVES, R. C., MANTILLA, J. N. Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 31-38, 2017.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT. Manual de Pavimentos Rígidos. 2.ed. – Rio de Janeiro, 2005.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT. Pavimento rígido – **Estudos de traços de concreto e ensaios de caracterização de materiais – Procedimento – Norma DNIT 054/2004-PRO**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 2013.

GAGG, Colin R. Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. **Engineering Failure Analysis**, v. 40, p. 114-140, 2014.

PANDITHARADHYA, B.J.; SHET, S.U.; SUHAS, R.; SHANKAR, A.U.R. **A study of utilization of iron ore tailings as partial replacement for fine aggregates in the construction of rigid pavements**. In: National Conference on Roads and Transport -Karnataka, India, 2017.

PROTÁSIO, Fernando Nóbrega Mendes et al. The use of iron ore tailings obtained from the Germano dam in the production of a sustainable concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123929, 2021.

SANTOS, Altair. OBRAS DE EDIFÍCIOS SÃO AS QUE MAIS CONSOMEM CONCRETO. **Portal Cimento Itambé**, p. 1, 24 fev. 2021. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/obras-de-edificios-sao-as-que-maisconsodem-concreto/>. Acesso em: 4 jan. 2022.

SHETTIMA, Ali Umara et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 72-79, 2016.